УДК 622.76

Н.Ю.ЛУГОВСКОЙ, *аспирант*, (*812*)*328-84-31*
М.Г.ЯКОВЛЕВ, *аспирант*, (*812*)*328-86-60*
О.В.ЗЫРЯНОВА, *канд. техн. наук*, *доцент*, (*812*)*328-86-60*
В.А.УТКОВ, *д-р техн. наук*, *профессор*, (*812*)*328-86-60*
Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург

N.Yu.LUGOVSKOY, *post-graduate student*, (*812*)*328-84-31*
M.G.YAKOVLEV, *post-graduate student*, (*812*)*328-86-60*
O.V.ZYRYANOVA, *PhD in eng. sc.*, *associate professor*, (*812*)*328-86-60*
V.A.UTKOV, *Dr. in eng. sc.*, *professor*, (*812*)*328-86-60*
National Mineral Resources University (*Mining University*), *Saint Petersburg*

ОСНОВНОСТЬ И ПРОЧНОСТЬ ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ АГЛОМЕРАТОВ

Экстремальная зависимость прочности агломерата от его основности объясняется содержанием в агломерате ферритов и силикатов кальция, которые образуют прочностную связку агломерата. Минимальная прочность агломерата соответствует основности 1,2-1,4. Это доказывает попытки оптимизировать технологию получения такого агломерата с планированием эксперимента. Лабораторные опыты показали, что для агломерата с основностью 1,4 при оптимальной линейной скорости его спекания около 18,7 мм/мин получается приемлемый выход «годного» агломерата не более 65 % даже при повышенном (более 6 %) расходе топлива. С целью повышения максимума прочности агломерата в указанной экстремальной зависимости целесообразно увеличивать содержание в нем оксида железа. Установлено, что с увеличением содержания железа на 1,5 % выход годного агломерата возрастает на 1 %. Однако повышение содержания железа в агломерате после максимума прочности приводит к некоторому ее снижению. Это объясняется повышением температуры плавления шихты и уменьшением количества прочностной ферритно-кальциевой связки.

Ключевые слова: агломерат, прочность, основность, содержание железа.

BASIC AND STRENGTH OF IRON ORE SINTER

Extreme dependence of the strength of sinter from its basicity is explained by content in the agglomerate iron and calcium silicates, which form a bundle of strength sinter. Minimum strength of sinter corresponds basicity about 1,2-1,4. This proves the attempts to optimize the technology of this agglomerate with the planning of the experiment. Laboratory experiments have shown that the basicity of sinter with 1,4 at the optimal linear velocity of its sintering about 18,7 mm/min, obtained an acceptable yield ratio not more than 65 %, even at elevated (above 6 %) fuel rate. In order to increase the maximum strength of the agglomerate in this extreme dependence appropriate to increase the content of iron oxide. Found that with the increase in iron content of 1,5 % yield of the agglomerate increases by 1 %. It is noted that the increase in iron content in the agglomerate after the maximum strength can lead to some of its decline, due to increased melting of the charge and decreases the amount of a strength ferritic-calcium binding.

Key words: agglomerate, strength, basicity, the iron content.

Промышленной и экспериментальной практикой установлено, что при самой распространенной основности (весовом отношении CaO/SiO_2) 1,4 прочность агломератов минимальна, что крайне нежелательно. Это объясняется полиморфизмом двухкальцие-

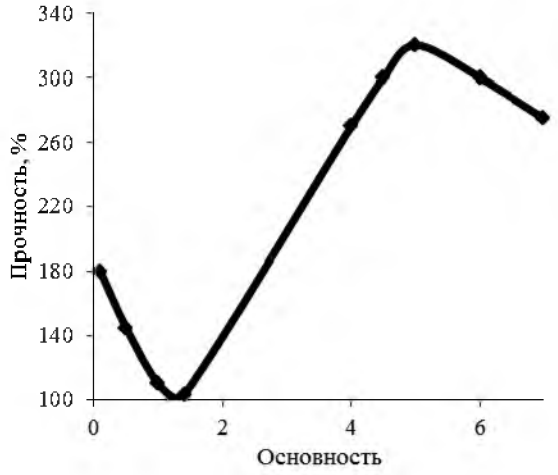


Рис.1. Влияние основности на прочность железорудного агломерата

вого силиката Ca_2SiO_4 [4]. Его фазовое превращение из β в γ-модификации сопровождается увеличением объема вещества на 10 %. Это происходит в теле железорудного агломерата при температуре около 675 °С, когда он находится в твердом состоянии после спекания с участием шлаковой связки при температуре около 1200 °С. Возникающее внутреннее напряжение и приводит к разупрочнению агломерата (рис.1) [1-3, 5].

Нами была предпринята попытка математически обосновать и экспериментально оценить технологические возможности повышения прочности агломерата из области минимума за счет оптимизации условий получения агломерата при основности 1,4. Для ее оценки приняты механическая прочность агломерата и удельная производительность агломерационной установки. Они выражены выходом фракций агломерата +10 мм (выход «годного» агломерата) и +10−5 мм после барабанных испытаний при оптимальных линейной скорости спекания и расходе технологического топлива.

При одинаковом качестве сырья и с учетом самобаланса возврата в качестве независимых переменных были приняты: x_1 – влажность шихты, %; x_2 – расход топлива, %; x_3 – высота слоя шихты, мм. Параметры оптимизации: y_1 – линейная скорость спекания, мм/мин; y_2, y_3 – выход фракции +10 и 0-5 мм после испытания в барабане соответственно, %.

Для определения средних значений параметров оптимизации и ошибок воспроизводимости были проведены пять опытов при нулевых условиях.

Чтобы проверить, насколько близка исследуемая область к оптимальной, на первом этапе исследования для описания функции отклика использовали полный факторный эксперимент типа 2^3. Это позволило оценить линейные коэффициенты и коэффициенты при взаимодействиях в уравнении регрессии:

$$\hat{y} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + \\ + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3$$

соответственно для y_1, y_2, y_3.

Коэффициенты регрессии рассчитывали по формуле

$$b_i = \frac{\sum_{n=1}^{N} x_{in}y_n}{N},$$

где $i = 0, 1, \ldots k$.

Значимость коэффициентов регрессии проверяли по t-критерию:

$$t = \frac{b_i\sqrt{N}}{s\{y\}}.$$

Знаки линейных коэффициентов регрессии противоположны для параметров оптимизации y_1 и y_2, y_1 и y_3. Линейный коэффициент b_2 для y_1 значим и отрицателен, т.е., чтобы увеличить линейную скорость спекания, необходимо понизить расход топлива. Для y_2 коэффициент b_2 значим и положителен, т.е. для увеличения выхода фракции +10 мм полезно увеличить расход топлива. Для y_3 коэффициент b_2 значим и отрицателен, но y_3 надо минимизировать. Следовательно, расход топлива должен быть увеличен. Аналогично, влияние фактора x_3. Коэффициент b_1 в уравнении для y_2 значим и положителен. Следовательно, значение этого параметра оптимизации можно увеличить, если в последующих опытах повысить влажность шихты. Для y_1 и y_2 коэффициент b_1 незначим. Подобная ситуация может быть в одном из следующих случаев: либо фактор не влияет на показатели процесса, что мало вероятно, либо мал интервал варьирования, либо нулевой уровень для этого фактора соответствует оптимальному.

Некоторые из коэффициентов при взаимодействиях оказались значимыми, но их величина несопоставима с эффектами первого порядка.

Среднее нулевых опытов и средние по всем значениям факторного эксперимента несколько отличаются друг от друга. Принимая во внимание, что $b_0 \to \beta_0 + \sum_i \beta_{ii}$ и поэтому по разности средних можно судить о сумме всех коэффициентов регрессии при квадратичных членах x_i^2, есть основание предполагать, что мы находимся в области, близкой к оптимальной.

Поскольку значения коэффициентов регрессии при линейных членах велики, на этом этапе исследования ограничимся линейным приближением. Для расчета условий следующих опытов, в которых может быть достигнута более высокая линейная скорость спекания (выход фракции +10 мм), применим метод крутого восхождения.

Значения производных от исследуемой функции y_1, соответственно, по x_1, x_2, x_3, подсчитанных из уравнения регрессии:

$$\hat{y} = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3;$$
$$\frac{\partial \hat{y}_1}{\partial x_1} = b_1; \frac{\partial \hat{y}_1}{\partial x_2} = b_2; \frac{\partial \hat{y}_1}{\partial x_3} = b_3.$$

Для расчета первого шага по этому пути брали приращение в одной из переменных (в данном случае высоту слоя 25 мм). Соответствующие изменения x_1 и x_2 пропорциональны их частным производным (коэффициентам регрессии). Так, для x_1 приращение составляет 0,15.

Условия опытов получали при последовательном прибавлении вычисленных приращений переменных к основному уровню.

Расчетные значения функций отклика следующие:

$$\hat{y}_1 = 18{,}94 \pm 0{,}83;$$
$$\hat{y}_2 = 74{,}0 \pm 0{,}83;$$
$$\hat{y}_3 = 9{,}62 \pm 0{,}83.$$

Анализ результатов показал, что для оптимизации функций отклика необходимо изменение факторов практически на одни и те же величины (например, изменение высоты слоя на 25 мм), но эти приращения для y_1, y_2, и y_3 имеют противоположный знак.



Рис.2. Зависимость прочности (выхода годного) агломерата от содержания в нем железа

Важно отметить, что полученные кривые зависимостей прочности агломерата от основности (рис.1) определяются содержанием в агломерате ферритов и силикатов кальция. Восходящая ветвь кривой объясняется развитием прочной ферритно-кальциевой связки агломератов. Поэтому увеличение содержания железа в агломерате, способствующее образованию ферритов кальция, приводит к повышению качества агломерата (рис.2).

Выводы

1. Экстремальная зависимость прочности агломерата от его основности объясняется содержанием в агломерате силикатов и ферритов кальция, которые образуют прочностную связку агломерата. Минимальная прочность агломерата соответствует основности 1,4.

2. При технологическом оптимуме для агломерата с основностью 1,4 получены скорость спекания около 18,7 мм/мин и выход фракции +10 мм не более 65 % даже при повышенном (до 6 %) расходе топлива.

3. С целью повышения максимума прочности агломерата целесообразно увеличивать содержание в нем оксида железа. Это доказывается экспериментально. С увеличением содержания железа на 1,5 % выход годного агломерата возрастает на 1 %.

4. При увеличении содержания железа в агломерате после оптимального максимума снижается прочность агломерата. Это объясняется повышением температуры плавления шихты и уменьшением количества прочностной ферритно-кальциевой связки агломерата.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Вегман Е.Ф.* Интенсификация агломерационного процесса / Е.Ф.Вегман, А.Н.Пыриков, А.Р.Жак. М., 1995. 105 с.

2. Доменное производство: Справочник в 2 т. Подготовка руд и доменный процес / И.Д.Баллон, Е.Ф.Вегман, Г.А.Воловик и др. М., 1980. Т.1. 496 с.

3. Металлургия чугуна / Е.Ф.Вегман, Б.Н.Жеребин, А.Н.Похвиснев и др. М., 2004. С.169-170.

4. Сулименко Л.М. Общая технология силикатов. М., 2004. 335 с.

5. Утков В.А. Высокоосновный агломерат. М., 1977. 156 с.

REFERENCES

1. *Vegman E.F., Pyrikov A.N., Jacques A.R.* The intensification of sintering process. Moscow, 1995. 105 p.

2. *Ballon I.D., Vegman E.F., Volovik G.A.* et al. Blast Furnaces: Handbook in two volumes. Preparation of ore and metallurgical process. Moscow, 1980. Vol.1. 496 p.

3. *Vegman E.F., Zherebin B.N., Pohvisnev A.N.* et al. Ironmaking. Moscow, 2004. P.169-170.

4. *Sulimenko L.M.* General technology of silicates. Moscow, 2004. 335 p.

5. *Utkov V.A.* High basic agglomerate. Moscow, 1977. 156 p.